

На рис. 1 представлены переходные процессы частоты вращения двигателя при варьировании нагрузки. На рис. 2 приведены переходные процессы для всех переменных состояния. Моделирование процессов произведено в системе Matlab 7.

### Выводы

Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что переходный процесс скорости дви-

гателя носит аperiodический характер, и стабилизация заданной скорости осуществляется практически без перерегулирования примерно за 100 интервалов дискретности управляющего сигнала при варьировании момента нагрузки в широких пределах. Можно также заключить, что локально-оптимальный регулятор является в некотором смысле адаптивным по отношению к возмущениям и обеспечивает заданную точность регулирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.

2. Букреев В.Г., Параев Ю.И. Адаптивные регуляторы в дискретных системах управления сложными электромеханическими объектами. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. – 278 с.

3. Черноруцкий Г.С., Сибрин А.П., Жабреев В.С. Следящие системы автоматических манипуляторов. – М.: Наука, 1987. – 272 с.

УДК 621.312

## КОММУТИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ОБМОТОК ЯКОРЕЙ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ КОММУТАЦИИ

С.И. Качин, Ю.С. Боровиков, О.С. Качин, Е.Н. Клыжко

Томский политехнический университет  
E-mail: borovikov@tpu.ru

*Рассмотрены свойства обмоток якорей, влияющие на характер коммутационного процесса на начальном этапе, приведены аналитические зависимости токов одновременно коммутируемых секций. Показано, что изменение взаимных магнитных связей между соседними секциями оказывает существенное влияние на качество коммутационных процессов и открывает пути для создания новых конструкций обмоток якорей.*

Наличие непосредственной связи качества коммутационных процессов с конструкциями и параметрами якорных обмоток общеизвестно и отражено в ряде работ различных авторов [1–4].

Основными факторами, определяющими характер коммутационного процесса и зависящими от свойств обмотки якоря, являются средняя реактивная ЭДС секции, ее чувствительность к влиянию основного поля и поля дополнительных полюсов, степень взаимного демпфирования секций на протяжении времени их коммутации сопротивлением скользящего контакта, а также в течение времени горения дуги под сбегавшим краем щетки.

Влияние указанных выше факторов на коммутационный процесс в той или иной степени исследовалось применительно к различным конструкциям якорных обмоток [1]. Наиболее подробно изучены коммутационные свойства простых петлевых и волновых обмоток, которые широко применяются в машинах малой мощности.

Причем основное внимание при этом уделялось особенностям коммутации в течение промежутка времени, когда щетка непосредственно контактирует с набегавшей и сбегавшей ламелями исследуемой секции. Поэтому основополагающие реко-

мендации и тенденции, которым нужно следовать для повышения коммутационных свойств данных типов обмоток в указанный интервал времени, к настоящему моменту в основном сформулированы, что оставляет мало шансов на реальное усиление коммутационных свойств.

Вместе с тем более детальное изучение особенностей процесса коммутации на начальном его этапе, когда коммутируемая секция электрически замкнута электрощеткой (так называемый процесс собственно коммутации [1]) позволяет выработать рекомендации по конструированию новых обмоток электрических машин, обладающих лучшими коммутационными свойствами в сравнении с известными техническими решениями [2].

Частный случай процесса собственно коммутации при щеточном перекрытии, равном единице, был достаточно подробно рассмотрен в [1], где выявлено неоднозначное влияние величины индуктивности секции на коммутационные свойства обмотки якоря в зависимости от соотношения других параметров коммутируемого контура и сформулированы условия достижения оптимальной величины индуктивности секции.

Значительно более сложными являются процессы коммутации при щеточном перекрытии,

большем единицы, когда на отдельных временных интервалах одновременно коммутируют две и более секций, имеющих между собой сравнительно высокую электромагнитную связь.

В этом случае наряду с ранее выявленными закономерностями [1] процесса коммутации проявляются новые особенности, обусловленные явлением обмена энергией между магнитосвязанными коммутируемыми секциями [2].

Анализ указанных особенностей процесса собственно коммутации целесообразно осуществлять на основе аналитических зависимостей, отражающих данное физическое явление.

Для этого необходимо найти решение системы дифференциальных уравнений токов одновременно коммутируемых секций.

В наиболее простом случае, который является и наиболее показательным (с точки зрения влияния взаимной магнитной связи на процесс собственно коммутации [1]), в коммутации участвуют две соседние секции, а изменение тока в них описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + i_1 [R_{s1} + r_{c1}(t) + r_{n1}(t)] = \\ = i_2 r_{n1}(t) - i_a r_{c1}(t) - e_{k1}; \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 [R_{s2} + r_{c2}(t) + r_{n2}(t)] = \\ = i_a r_{n2}(t) + i_1 r_{c2}(t) - e_{k2}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_{s1}, R_{s2}$  – активные сопротивления секций 1, 2;  $L_1, L_2$  – индуктивности коммутируемых секций 1, 2;  $M_{12}$  – взаимная индуктивность между секциями 1, 2;  $i_1, i_2$  – токи секций 1, 2;  $r_{n1}(t), r_{n2}(t), r_{c1}(t), r_{c2}(t)$  – контактные сопротивления соответственно под набегающими и сбегаящими краями щетки для секций 1, 2;  $i_a$  – ток параллельной ветви;  $e_{k1}, e_{k2}$  – коммутирующие ЭДС секций 1, 2.

Аналитическое решение системы (1) для случая, когда  $L_1 = L_2 = L$ ;  $R_{s1} = R_{s2} = R_s$ , может быть получено на основе определения суммы токов  $i_1, i_2$  и их разницы, а также при принятии ряда традиционных допущений [1].

Сумма токов  $i_1$  и  $i_2$  ( $i_{12}^+$ ) рассчитывается по выражению (2), а их разность ( $i_{12}^-$ ) по ур. (3).

$$\begin{aligned} i_{12}^+ = & [i_a + i_1(t_0)] \cdot B + \frac{i_a \cdot r_{\max}}{C} [e^{\frac{t_0-t}{\tau_R}} - B] + \\ & + \frac{i_a \cdot r_{\max} \cdot e^{-\frac{T_k}{\tau_R}}}{C} [e^{\frac{t_0}{\tau_R}} \cdot B - e^{\frac{t}{\tau_R}}] + \frac{e_{k1} \cdot M}{D} [e^{-\frac{t}{\tau_e}} - e^{\frac{t_0}{\tau_e}} \cdot B] + \\ & + \frac{e_{k1} \cdot M \cdot e^{-\frac{T_k}{\tau_e}}}{D} [e^{\frac{t}{\tau_e}} - e^{\frac{t_0}{\tau_e}} \cdot B] + \frac{e_{k2} \cdot M}{D} [e^{\frac{t_0-t}{\tau_e}} - B] + \\ & + \frac{e_{k2} \cdot M \cdot e^{-\frac{T_k}{\tau_e}}}{D} [e^{\frac{t-t_0}{\tau_e}} - B] + \frac{(e_{k1} + e_{k2}) \cdot N}{A_{12}^+} [B - 1]. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} i_{12}^- = & [i_1(t_0) - i_a] \cdot B^- + \frac{i_a \cdot r_{\max}}{C^-} [B^- - e^{\frac{t_0-t}{\tau_R}}] + \\ & + \frac{i_a \cdot r_{\max} \cdot e^{-\frac{T_k}{\tau_R}}}{C^-} [-e^{\frac{t}{\tau_R}} + e^{\frac{t_0}{\tau_R}} \cdot B^-] + \\ & + \frac{e_{k1} \cdot M}{D^-} [e^{-\frac{t}{\tau_e}} + e^{\frac{t_0}{\tau_e}} \cdot B^-] + \\ & + \frac{e_{k1} \cdot M \cdot e^{-\frac{T_k}{\tau_e}}}{X} [e^{\frac{t}{\tau_e}} - e^{\frac{t_0}{\tau_e}} \cdot B^-] + \frac{e_{k2} \cdot M}{D^-} [B^- - e^{\frac{t_0-t}{\tau_e}}] + \\ & + \frac{e_{k2} \cdot M \cdot e^{-\frac{T_k}{\tau_e}}}{X} [B^- - e^{\frac{t-t_0}{\tau_e}}] + \frac{(e_{k1} - e_{k2}) \cdot N}{A_{12}^-} [B^- - 1], \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} B = & e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})} (t_0-t)}; A_{12}^+ = R_s + r_c(T_k); C = A_{12}^+ - \frac{L+M_{12}}{\tau_R}; \\ D = & A_{12}^+ - \frac{L+M_{12}}{\tau_e}; B^- = e^{\frac{A_{12}^-}{(L-M_{12})} (t_0-t)}; \\ A_{12}^- = & R_s + r_c(T_k) + 2r_n(T_k); C^- = A_{12}^- - \frac{L-M_{12}}{\tau_R}; \\ D^- = & A_{12}^+ - \frac{L-M_{12}}{\tau_e}; X = A_{12}^+ + \frac{L-M_{12}}{\tau_e}; \\ M = & \frac{A \cdot (1 + e^{-T_k/\tau_e} - 2e^{-T_k/2\tau_e})}{r_n(T_k/2) + r_c(T_k/2) + R_s} - (1 + e^{-T_k/\tau_e} - 2e^{-T_k/2\tau_e}); \\ N = & 1 + M \cdot (1 + e^{-T_k/\tau_e}); \end{aligned}$$

$i_1(t_0)$  – ток  $i_1$  в момент начала коммутации второй секции;  $t_0$  – время начала коммутации второй секции;  $\tau_R, \tau_e$  – постоянные, характеризующие соответственно изменение расчетного переходного сопротивления во времени и интенсивность изменения расчетного значения коммутирующей ЭДС в течение периода коммутации;  $A$  – активное сопротивление коммутируемого контура.

В результате значения токов  $i_1$  и  $i_2$  могут быть найдены по уравнениям:

$$i_1 = (i_{12}^+ + i_{12}^-)/2; \quad i_2 = i_{12}^+ - i_1. \quad (4)$$

Следовательно, во время коммутации лишь одной секции для расчета её тока могут быть использованы аналитические зависимости, приведенные в [1], а при одновременной коммутации двух соседних секций – полученные выражения (2–4).

Анализ закономерностей процесса коммутации секций при обмене энергией с соседними магнитосвязанными секциями проведем для случая, когда число элементарных пазов в реальном пазу якоря равно двум. Будем полагать, что секции одного паза имеют взаимную индуктивность на уровне  $(0,9...0,95)L_s$  [1], а взаимная магнитная связь между секциями, лежащими в разных пазах, равна нулю.

В этом случае первая (в порядке коммутации) секция паза будет коммутировать с обменом энергией на временном интервале, когда одновременно с ней коммутирует вторая секция паза, т.е. в конце периода коммутации. Вторая секция паза, наоборот, коммутирует с обменом энергией (с первой секцией паза) в начале периода коммутации.

Расчеты показывают, что наличие взаимной магнитной связи у секции на начальном этапе коммутации практически не сказывается на величине ее тока разрыва в конце периода собственно коммутации, поскольку после окончания процесса обмена энергией между секциями происходит достаточно быстрый возврат тока секции до уровня, характерного для обособленной секции, не имеющей магнитных связей с другими короткозамкнутыми контурами.

Так, например, на рис. 1 приведены кривые токов второй и двух первых секций пазов якоря при недокоммутации (рис. 1, а) и перекоммутации (рис. 1, б) в сравнении с кривыми соответствующих токов обособленных секций, коммутирующих в аналогичных условиях ( $e_{k1}=e_{k2}$ ).

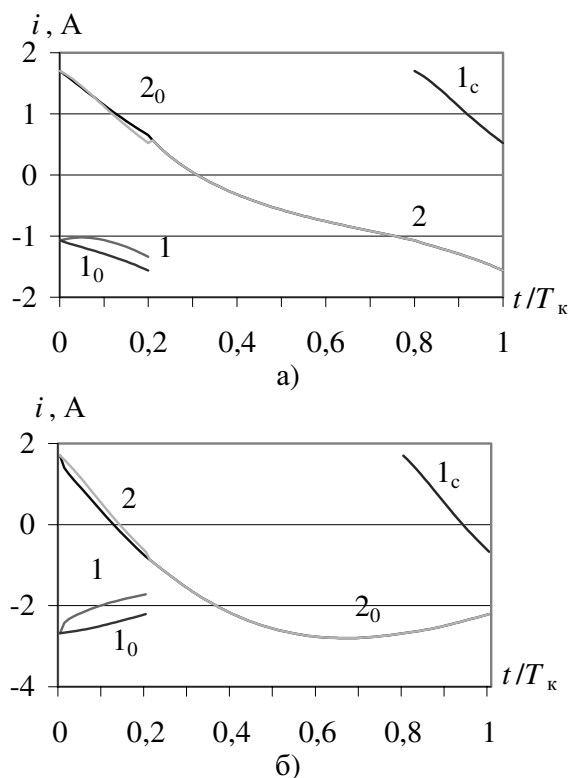


Рис. 1. Кривые токов второй и двух первых секций пазов якоря при: а) недокоммутации; б) перекоммутации

Из представленных зависимостей видно, что в период обмена энергией секций 1 и 2 одного паза наблюдается отклонение их токовых кривых от соответствующих характеристик обособленных секций (кривые  $1_0$  и  $2_0$ ). Затем кривые токов исследуемой секции 2 становятся идентичными кривой токов обособленной секции ( $2_0$ ) до конца расчетного периода коммутации. Это обусловлено стабилизирующей ролью активных сопротивлений коммути-

руемых контуров [1, 3], а также отсутствием взаимной магнитной связи у исследуемой секции и первой секции следующего паза (кривые  $1_c$ ).

Следовательно, взаимный обмен энергией на начальной стадии процесса коммутации секции (при реальных величинах параметров коммутируемого контура) не влияет на итоговое значение ее тока разрыва, и данное явление можно не учитывать при оценке качества коммутации.

Наоборот, воздействие взаимных магнитных связей коммутируемых контуров существенно сказывается на величине тока разрыва той секции, которая в это время завершает процесс собственно коммутации (кривые 1 на рис. 1, а и б). Данное обстоятельство вызвано тем, что обмен энергией у первой секции паза происходит до самого конца расчетного периода коммутации, и не остается времени на стабилизацию тока секции подобно тому, как это имеет место во второй секции паза.

В результате недокоммутация первой секции паза (рис. 1, а) может усиливаться (ток разрыва по модулю возрастает с 0,136 до 0,359 А), а перекоммутация (рис. 1, б) может снижаться (ток разрыва изменяется от +0,506 до +0,017 А), либо смениться недокоммутацией в сравнении с обособленной или второй секцией паза.

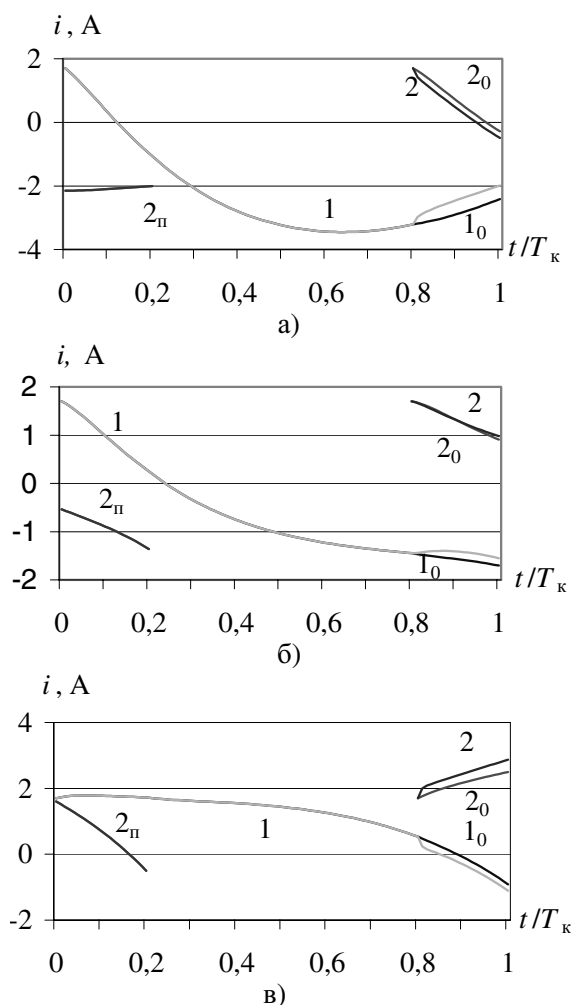
В общем случае наличие взаимной магнитной связи ведет либо к замедлению коммутационного процесса первой секции паза, либо к его ускорению в зависимости от величины  $e_k$  и параметров коммутируемого контура.

Количество возможных вариантов изменения тока первой секции паза в конце расчетного периода коммутации возрастает в случае неравенства коммутирующих ЭДС первой и второй секций паза.

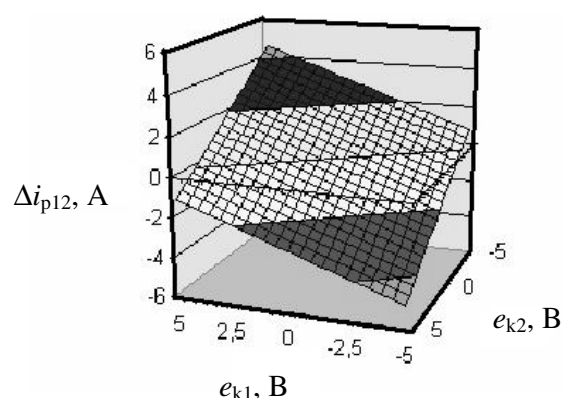
При этом возможно выравнивание токов разрыва в секциях паза, как это имеет место на рис. 2, а, ( $i_{p1}=0,285$  А у кривой 1 и  $i_{p2}=0,303$  А у кривой 2, второй секции предыдущего паза). Здесь выравнивание токов разрыва происходит вследствие снижения тока разрыва первой секции с 0,707 А благодаря обмену энергией со второй секцией паза. Выравнивание токов разрыва секций паза в случае, проиллюстрированном на рис. 2, б, наоборот, происходит из-за увеличения тока разрыва первой секции от нуля до -0,151 А. Возможно также увеличение разницы между токами разрыва секций паза, как это показано на рис. 2, в, (ток разрыва первой секции паза здесь снижен с -0,787 до -0,593 А, а  $i_{p2}=-1,192$  А).

Следовательно, варьируя величины коммутирующих ЭДС в секциях паза, можно выравнивать токи разрыва секций или снижать их сумму (по модулю) в зависимости от поставленной задачи.

На рис. 3 представлена характерная зависимость разницы токов разрыва первой и второй секций паза ( $\Delta i_{p12}=i_{p1}-i_{p2}$ ) от сочетания коммутирующих ЭДС в указанных секциях, которая позволяет выбирать требуемое их соотношение для достижения минимальной разности  $\Delta i_{p12}$ .



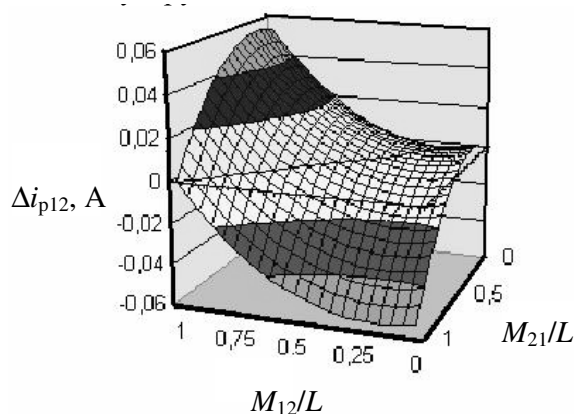
**Рис. 2.** Кривые изменения токов в коммутируемых секциях при варьировании величины коммутирующих ЭДС при: а) снижении тока разрыва первой секции; б) увеличении тока разрыва первой секции; в) увеличении разницы между токами разрыва секций паза



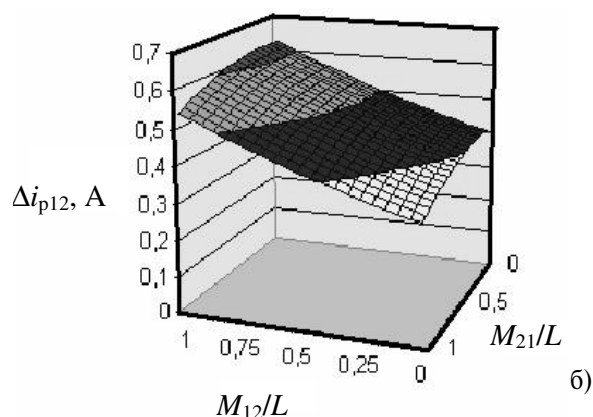
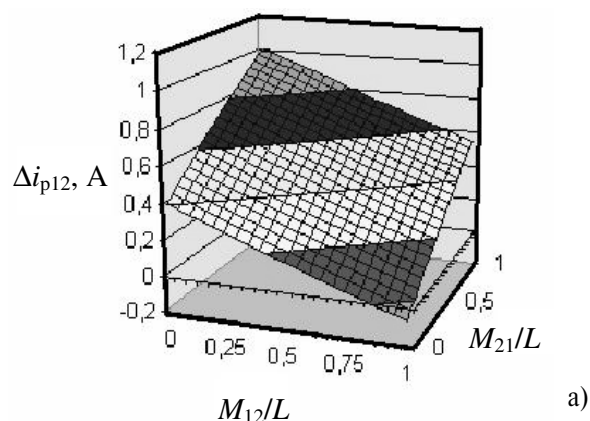
**Рис. 3.** Зависимость разницы токов разрыва от сочетания коммутирующих ЭДС

Достижение выбранного соотношения ЭДС может осуществляться соответствующим подбором параметров дополнительных полюсов (например величины зазора) или необходимым распределением магнитного поля под основными полюсами (для машин без дополнительных полюсов).

В том случае, если возможности варьирования коммутирующих ЭДС в секциях ограничены (вследствие конструктивных, технологических и иных причин), то выравнивание токов разрыва секций паза (а также минимизация суммы их модулей) может быть осуществлена путем регулирования соотношения между взаимной индуктивностью первой и второй секцией одного паза ( $M_{12}$ ) и взаимной индуктивностью второй секции рассматриваемого паза и первой секцией следующего паза ( $M_{21}$ ).



**Рис. 4.** Зависимость разницы токов разрыва от соотношения между взаимными индуктивностями при равенстве коммутирующих ЭДС



**Рис. 5.** Зависимость разницы токов разрыва от соотношения между взаимными индуктивностями при неравенстве коммутирующих ЭДС для: а) непереворсивных; б) реверсивных машин

Естественно, что при  $e_{k1}=e_{k2}$  равенство токов разрыва секций паза может быть достигнуто при равенстве указанных выше взаимных индуктивностей ( $M_{12}=M_{21}$ ). На рис. 4 представлена зависимость разницы токов разрыва от соотношения между взаимной индуктивностью первой и второй секцией одного паза ( $M_{12}$ ) и взаимной индуктивностью второй секции рассматриваемого паза и первой секцией следующего паза ( $M_{21}$ ) при равенстве коммутирующих ЭДС.

Минимум самих токов разрыва может достигаться при различных величинах взаимных индуктивностей в зависимости от значений коммутирующих ЭДС. В условиях усиления перекоммутации и недокоммутации минимум токов разрыва имеет место при максимальных величинах взаимных индуктивностей.

Иное соотношение между  $M_{12}$  и  $M_{21}$  необходимо при разных коммутирующих ЭДС в секциях.

Так, например, для случая, характерного для нереверсивных машин без дополнительных полюсов (рис. 2, а), минимальная разница  $\Delta i_{p12}$  достигается в области  $M_{12}/L=1$  и  $M_{21}/L=0$  (рис. 5, а). В реверсивных машинах без дополнительных полюсов (характерные кривые токов приведены на рис. 2, в) минимальная разница  $\Delta i_{p12}$  имеет место при  $M_{12}/L=0$  и  $M_{21}/L=1$  (рис. 5, б).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толкунов В.П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. — М.: Энергия, 1979. — 224 с.
2. Качин С.И. Улучшение эксплуатационных характеристик коллекторных машин малой мощности // Электричество. — 1997. — № 6. — С. 28–32.

Однако при ином соотношении коммутирующих ЭДС может иметь место и другое оптимальное сочетание взаимных магнитных связей. Характерно, что возможны комбинации, при которых ток разрыва первой секции достигает максимума, а ток разрыва второй секции — минимума.

#### Выводы

1. Полученные аналитические выражения позволяют рассмотреть физическое явление обмена энергией между магнитосвязанными коммутируемыми секциями на начальном этапе коммутации (для случая совместной коммутации двух секций).
2. Проведенные исследования показывают, что наиболее перспективно создание таких конструкций обмоток якоря, в которых обеспечивается равенство коммутирующих ЭДС в секциях и взаимных магнитных связей между секциями, а также максимальные значения последних, поскольку в этом случае возможно достижение не только равенства токов разрыва секций, но и их минимизация в условиях повышенной перекоммутации и недокоммутации.

3. Трушков А.М. Исследование условий надежного токосъема машин постоянного тока при щеточном перекрытии больше единицы // Оптимальная коммутация машин постоянного тока: Труды Омского института инженеров транспорта. — Омск, 1971. — Т. 122. — С. 37–45.
4. Schroeter F. Die Kommutierungsfähigkeit der Kohlebuerste // Electrotechnische Zeitschrift. — 1992. — № 3. — С. 4–8.

УДК 621.91/92:534.014.3

## МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ФИНАНСОВОГО ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

М.В. Волков, В.В. Литвак, Г.З. Маркман

Томский политехнический университет

E-mail: rcr@tpu.ru

*Предлагается новая модель энергофинансовых потоков компании, на основе которой возможно получение балансов предприятия, сведений об отношениях с отдельными объектами, текущей и средней себестоимости производства и транспорта электро-энергии и тепла, исследование режимов работы предприятия.*

Для совместного представления всей совокупности энергетических, финансовых, материальных и других взаимосвязей между поставщиками и потребителями энергетических ресурсов возможно построение модели, где эти взаимосвязи представлены в виде потоков, моделируемых сетевыми графами [1].

Потоки электрической энергии и тепла, газа и нефтепродуктов, перевозки топлива направляются от источника к потребителю. Их можно уподобить речным потокам, стремящимся к океану, благодаря

рельефу территории. Своеобразный рельеф формируют и потоки энергоресурсов, финансов, материалов и т.п. Они имеют многолетнюю динамическую структуру устойчивого делового оборота. Энергетические потоки складываются в энергетический баланс, который остается основой для многих инфраструктурных решений связанных с проектированием развития, планированием и оперативным управлением территориальной экономикой. Многие интегральные показатели производ-